

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	手先の周期運動を利用した直列ロボットの誤差感度に基づく機構パラ ータ同定と制御
Title(English)	
著者(和文)	小池武
Author(English)	Takeshi Koike
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12493号, 授与年月日:2023年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:武田 行生,岩附 信行,山浦 弘,岡田 昌史,土方 亘
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12493号, Conferred date:2023/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース
学生氏名： Student's Name	小池 武	

申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	岡田昌史	
指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	土方 亘	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

国際的な平均賃金の上昇と国内での顕著な人手不足の進行から、溶接作業の自動化が強く求められている。アーク溶接ロボットは溶接の自動化で利用されている直列ロボットであるが、アーク溶接は熟練が必要とされる作業であり、ロボットの制御性能を向上させる必要がある。なかでもアーク溶接に特徴的な周期運動であるウィービング運動での手先精度向上が重要である。本論文はウィービングに代表される直列ロボットの周期運動を対象とし、運動が周期的であるときに周期的な誤差が発生することを利用し、周期運動に対する感度を考慮することで、ロボットの周期運動における手先位置精度を向上させる機構パラメータの同定と制御系設計について示したものである。

第1章「序論」では、社会的要請からアーク溶接ロボットでのウィービング動作での手先位置精度向上が必要であり、特にクーロン摩擦力、モデル化誤差の影響を低減する手段が必要であること、ロボットが交換される場合には手先位置決めに関連する誤差要素が異なる影響を低減する必要があることを述べ、ロボットの運動における感度を考慮することによってこれらの問題を解決することが本研究の目的であると述べている。

第2章「動力学モデルと運動方程式」では、第3章～第5章で用いるロボットの運動学解析、動力学モデル導出を行い、関節角度誤差と手先誤差の関係および運動方程式が最小動力学パラメータで表すことができることを示している。

第3章「誤差解析に基づく摩擦補償のためのフィードフォワード制御」では、周期運動におけるクーロン摩擦の手先誤差に対する感度を考慮したクーロン摩擦補償フィードフォワード (FF) トルクを設計している。一般的な、クーロン摩擦トルクと逆方向の矩形の補償 FF トルクを入力する補償手法では、タイミングずれにより残存する急峻な合成トルクが駆動系に悪影響を及ぼす可能性があるため、タイミングずれの影響が小さくなるなめらかに変化する FF 補償トルクを設計する手法を提案している。この際、周期運動に対する摩擦力の感度に基づく手先誤差解析の結果を用いて、なめらかな摩擦補償 FF トルクの設計を行っている。摩擦力の手先誤差に対する感度を用いることで、その影響の大きさを評価し低減することに利用すること、誤差の発生方向など対象タスク特有の条件を考慮することで生まれる入力の冗長性を利用することを可能としている。また、提案手法によるなめらかな FF トルクとクーロン摩擦の符号を反転させた矩形のトルクを用いて制御を行った場合と比較し、提案手法により振幅誤差が低減されることを確認している。

第4章「運動の感度解析に基づくパラメータの確率的同定」では、ロボットの機構パラメータの同定に感度を利用することを提案している。ノイズの影響やモデル化されない動特性

が存在するため、パラメータ同定結果はあくまで同定に用いた動作をよく近似したパラメータとなること、そのため、目的運動のデータから同定することが望ましいが、ある特定の運動は最小動力学パラメータのすべてを同定するだけの情報を持っていないため目的運動のデータだけを用いて同定することはできないことが課題であり、これに対し同定用動作を用いながら目的運動を同定に用いたかのように目的運動での精度が向上できる手法について提案している。この同定手法では、想定したロボットモデルと実機との差などから生じる誤差をパラメータが確率的に変動しているとみなすことで、目的の周期動作において特定方向の手先位置精度が向上できるパラメータを同定している。その際、周期的な運動における動力学パラメータなどの手先誤差に対する感度を考慮することで手先誤差感度の高い重要なパラメータを精密に、感度の低い重要でないパラメータは粗く同定するなど、重要度に応じた同定を可能としている。ロボットを提案手法で同定したパラメータを用いて動作させた実験結果と、最小二乗法で同定したパラメータを用いて動作させた実験結果を比較することで、提案手法によって周期運動で手先の上下方向誤差が低減されるパラメータが得られたことを検証している。

第 5 章「独立画像計測による関節角度原点誤差の高精度同定」では、ロボットの機体差すなわち関節角度原点誤差(関節角度の零点調整誤差)に注目し、感度に基づいて関節角度原点誤差を同定しやすい軌道を設計し、画像を用いて同定する手法を提案している。運動の感度を考慮する方法を応用し、関節角度原点誤差の手先位置に対する感度を最大化する姿勢を設計することによって、特定の関節の角度原点誤差が精密に同定できる点を求めている。このとき、軌道の法線方向に誤差が大きくなるように、感度として法線方向感度を用いることで計測精度を向上させている。求まった点を楕円上に配置するとともに、ロボットの手先が楕円上を動作した位置を多数利用することで、短時間で簡易に計測できるようにし、加えて、ロボット位置計測とカメラが非同期であることも考慮した同定方法を提案している。提案手法の有効性について、設計された軌道を用いてあらかじめ準備した関節角度オフセットを与え同定する実験によって、与えたオフセットが高精度に同定できたことによって検証している。

第 6 章「結論」では本論文で得られた成果を総括し、アーク溶接ロボットへ応用することで想定される効果について述べている。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	小池 武		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	岡田昌史
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	土方 亘

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This paper focuses on the periodic motions of serial robots and proposes parameter identification and controller design method for high accuracy. By utilizing the sensitivity of motion, the accuracy of the end-effector position in the periodic motion is improved, and a small machine difference that has a large effect on the error of the end-effector position is identified.

In the first section, it is described that the objective of this study is to reduce the end-effector position error associated with the periodic motion of the robot by considering the sensitivity of the robot's motion.

In the second section, the kinematics and dynamics model of the robot that is used in the following chapters are introduced.

In the third chapter, it is proposed a friction-compensated feedforward design method using the sensitivity of frictional force to periodic motion. To design a smooth friction-compensated FF torque, the sensitivity of the friction force to the error is used to evaluate and reduce the magnitude of its effect. By comparing the smooth FF torque using the proposed method and a rectangular torque in which the sign of the Coulomb friction is reversed, it is confirmed that the vertical motion error and the amplitude error are reduced.

In the fourth chapter, a parameter stochastic identification method is proposed using the sensitivity of the minimum dynamical parameters to periodic motion error. The identification of parameters is performed to minimize the dynamic sensitivity of the parameters to end-effector position error in cyclic motion. By considering the sensitivity of the parameters, important parameters with high sensitivity to end-effector position error are precisely identified.

In the fifth chapter, by considering the position at which the sensitivity of the error to the end-effector positions is maximized, the method is proposed to accurately identifies the joint angular origin error. The position with the maximum sensitivity in the normal direction that accurately identify the angle origin error of a certain joint is placed on an ellipse. In addition, all positions where the end-effector position moves along the trajectory are used.

In the sixth chapter, the conclusion is indicated.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).